

I.1 Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne,[1],[2]

Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones ou asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes, [3]

Dans ce chapitre, on présente un survol sur les systèmes de conversion éoliens de manière générale puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Les statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde sans oublier l'Algérie, et le principe de fonctionnement d'une éolienne, ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens.

I.2.Energie Eolienne.

I.2.1. Définition

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" i.e (non dégradée), géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences

L'intérêt actuel pour l'énergie éolienne provient du besoin d'élaborer des systèmes d'énergie propre durables auxquels on peut se fier à long terme. L'aérodynamique et l'ingénierie moderne ont permis d'améliorer les éoliennes. Maintenant, elles offrent une énergie fiable, rentable, non polluante pour les applications des particuliers, des communautés et pour les applications nationales.

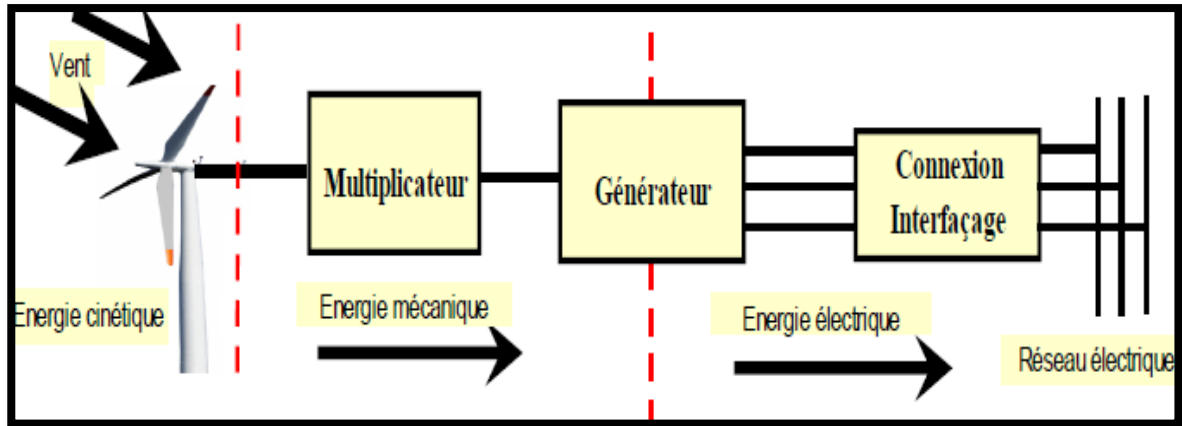


Figure I 1 Structure générale d'un système de conversion de l'énergie éolienne

I.2.2. Le Rôle

Le système éolien a pour rôle d'extraire une partie de l'énergie cinétique du vent et la convertir en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes

- Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique. Cette dernière est transmise à la génératrice au moyen d'un arbre de transmission et un éventuel réducteur de vitesse.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

I.2.3 Situation actuelle d'énergie éolienne dans le monde

L'énergie éolienne pourrait fournir le un cinquième de l'électricité mondiale dans les vingt ans. Le marché mondial pour cette énergie a connu une croissance de 41.7% en 2009 et une hausse moyenne de 28.6% par ans au cours des treize dernières années

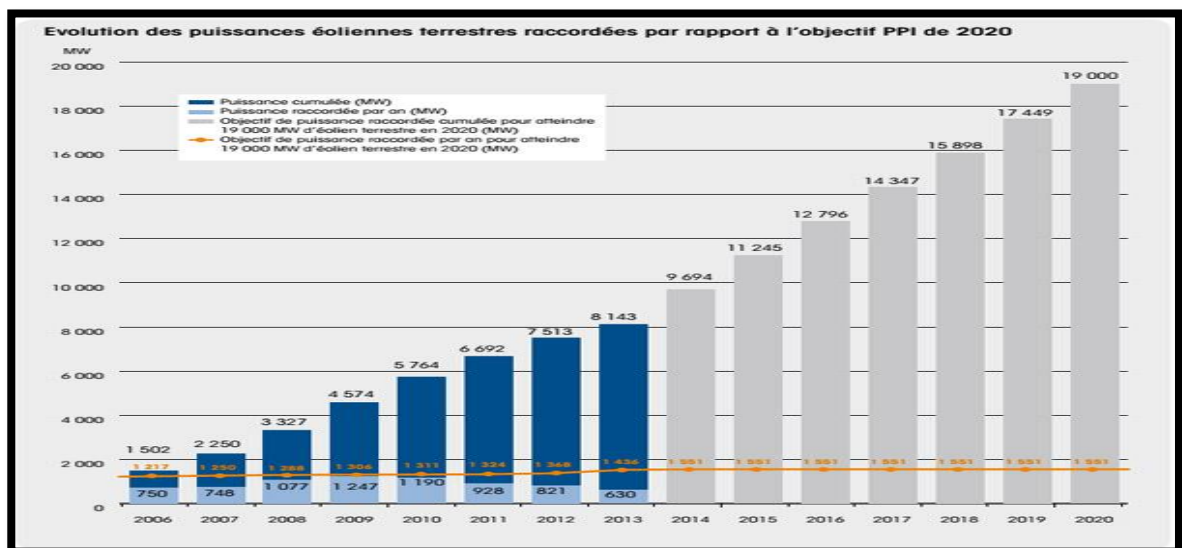


Figure I 2 Evolution de la puissance éolienne installée dans le monde

La puissance éolienne installée dans le monde devrait être multipliée par 3 pour atteindre 910 GW en 2025 et le marché mondial de l'éolien devrait, pour sa part, plus que doubler au cours de cette période, passant de 21 à 47 milliards d'euros. Les pays qui s'intéressent au développement de l'éolien sont encore en phase de premier investissement (mise en service dans le champ éolienne qui n'existaient pas auparavant). De fait, les capacités installées croissent en permanence mais à des rythmes différents selon les pays, et classer les états par puissance installée donne un résultat mouvant d'une année à l'autre. Néanmoins, il ressort des chiffres actuels que les plus gros pays investisseurs sont les pays occidentaux (USA et Europe), mais l'Asie, avec la Chine commence à tenir un rang important Tableau I.1.

Country	MW	% SHARE
**PR China	16,100	45.4
Germany	3,238	9.1
UK	1,883	5.3
India	1,729	4.9
Canada	1,599	4.5
USA	1,084	3.1
*Brazil	948	2.7
Poland	894	2.5
Sweden	724	2.0
Romania	695	2.0
Rest of the world	6,573	18.5
Total TOP 10	28,894	81
World Total	35,467	100.0

Table I 1 La puissance éolienne totale installée les 10 premiers pays en 2013.

En 2013, la région **Europe** –Moyen–Orient domine le marché éolien en détenant 40% du marché mondial. Mais alors que la Chine investit des milliards d'euros dans l'énergie éolienne, plusieurs gouvernements européens ont décidé de réduire les subventions accordées à l'électricité éolienne. Ces décisions pourraient ralentir le marché de l'éolien sur le Vieux Continent, qui ne devrait plus représenter que 34% du marché mondial en 2030

En Afrique du Nord, le développement de la puissance éolienne continue en Egypte, Maroc et Tunisie avec respectivement 55 MW, 10 MW et 34 MW de nouvelles capacités installées.

I.2.4. Situation actuelle d'énergie éolienne dans l'Algérie

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m /s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m /s dans la région d'Adrar.

Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie, [4]

Ceci a permis l'identification de huit zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes,

- deux zones sur le littoral
- trois zones sur les hauts plateaux
- et quatre zones en sites sahariens

En termes de ressources énergétiques éoliennes de l'Algérie celles-ci ont déjà été estimées par le **CDER** (**C**entre de **D**éveloppement des **E**nergies **R**enouvelables) depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien à travers le territoire national (Figure I.3).

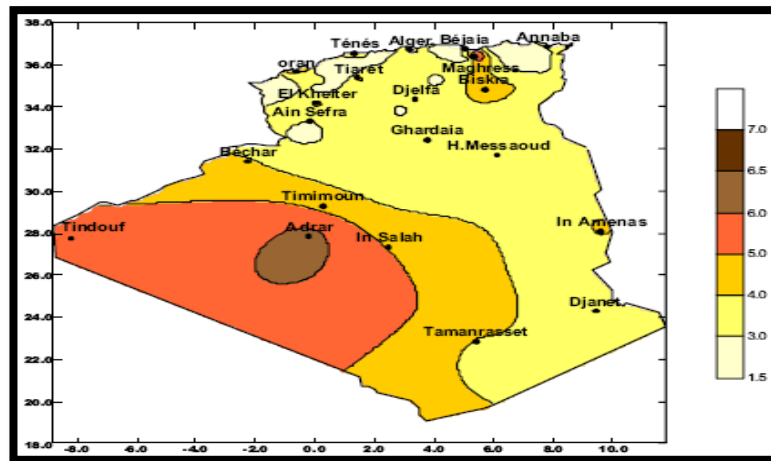


Figure I 3 Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s).

I.3 L'aérogénérateur

Un aérogénérateur est un dispositif utilisé pour le transfert de l'énergie cinétique du vent vers l'arbre de transmission en mouvement rotatif en énergie électrique, cette conversion se

fait en deux étapes

- Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Le fonctionnement général est illustré par la Figure I-4L'ensemble de la chaîne de Conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique

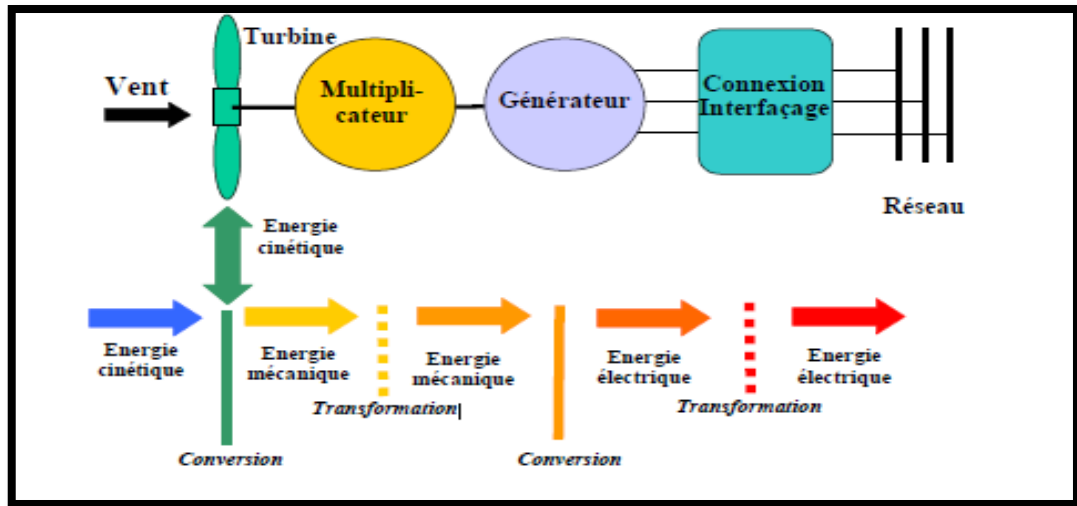


Figure I 4 Principe de la conversion d'énergie

I.3.1.Type d'aérogénérateurs

Selon l'utilisation et la technologie d'éolienne, certaines de ces parties sont plus ou moins développées. On distingue deux grandes familles d'éoliennes [3]

- Les éoliennes autonomes
- Les éoliennes raccordées au réseau

Ceci va beaucoup influencer le procédé de conversion, notamment l'un des objets de notre étude y associer ou non une unité de stockage d'énergie. Ce stockage pourra être réalisé au moyen de batteries, d'accumulateurs cinétiques (volant d'inertie) ou autre. La conception mécanique peut aussi aboutir à des éoliennes totalement différentes

a. Eoliennes à axe vertical

Elles ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique de nombreuses variantes ont vu le jour mais rares sont celles qui ont atteint le stade de l'industrialisation[5],

Ce type d'éolienne a été de plus en plus abandonné à cause des différents inconvénients qu'il a posés. Des problèmes d'aéroélasticité et la grande occupation du sol ont été les raisons de cet abandon au profit des éoliennes à axe horizontale

Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur et la boîte d'engrenage sont disposés au niveau du sol, ce qui est plus simple et par conséquent économique. La maintenance du système est également simplifiée dans la mesure où elle se fait au sol.[6]

a.1 Avantages Eoliennes à axe vertical

Les caractéristiques de ce type

- Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie au pied de l'éolienne.
- facilitant ainsi les opérations de maintenance.
- doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques.
- Elles sont d'une conception simple qui ne nécessite pas de système d'orientation par rapport au sens du vent, mais elles ont une vitesse de rotation lente.
- Elles démarrent à des vitesses de vent faibles voisines de 2 à 3 m/s

a.2 Inconvénients des éoliennes à axe vertical

- profils symétriques donc moins performants.
- manque de couple au démarrage.
- L'effet important du sillage du rotor.
- Le couple moteur cyclique et donc fatigue.
- Vitesse de rotation lente donc couple important



Figure I 5 Turbine à axe vertical

b. Eolienne à axe horizontal

Ce type d'éolienne est le plus répandu dans le monde. Ce système se base sur le principe de portance aérodynamique, les pales sont profilées de la même façon qu'une aile d'avion et la Circulation du flux d'air dans la turbine entraîne la rotation du rotor de la machine.[7]

Les éoliennes généralement utilisées pour la production d'électricité sont des éoliennes rapides à 2 ou à 3 pales, [8] ceci pour plusieurs raisons

- Elles sont légères et donc moins chères.
- Elles tournent plus vite car le multiplicateur utilisé présente un rapport de multiplication moins important d'où sa légèreté et des pertes réduites.
- Le couple nécessaire pour la mise en route de ce type d'aérogénérateur est très faible et donc un fonctionnement à faible vitesse de vent.

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal

Amont - le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

Aval-le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.



Figure I 6 Turbine à axe horizontal

b-1 Principales composantes des éoliennes à axe horizontal

L'éolienne à axe horizontale étant le sujet de notre étude, sera décrite en citant ses différents composants.[9]

En générale, l'éolienne à axe horizontale est constituée de trois éléments principaux ; La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu

- La tour : C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation des puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol mais aussi permettre l'utilisation de pales plus longues. La tour a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.
- La nacelle : Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler la turbine éolienne à la génératrice électrique (figure 1.8). Elle comprend les éléments suivants
- Arbre.

- Multiplicateur.
- Roulements.
- Le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.
- Le générateur qui est dans le cas de cet exposé une MADA.
- Les systèmes d'orientation des pales (régulation de la vitesse) et de la nacelle (la surface balayée par l'aérogénérateur doit être perpendiculaire à la direction du vent).

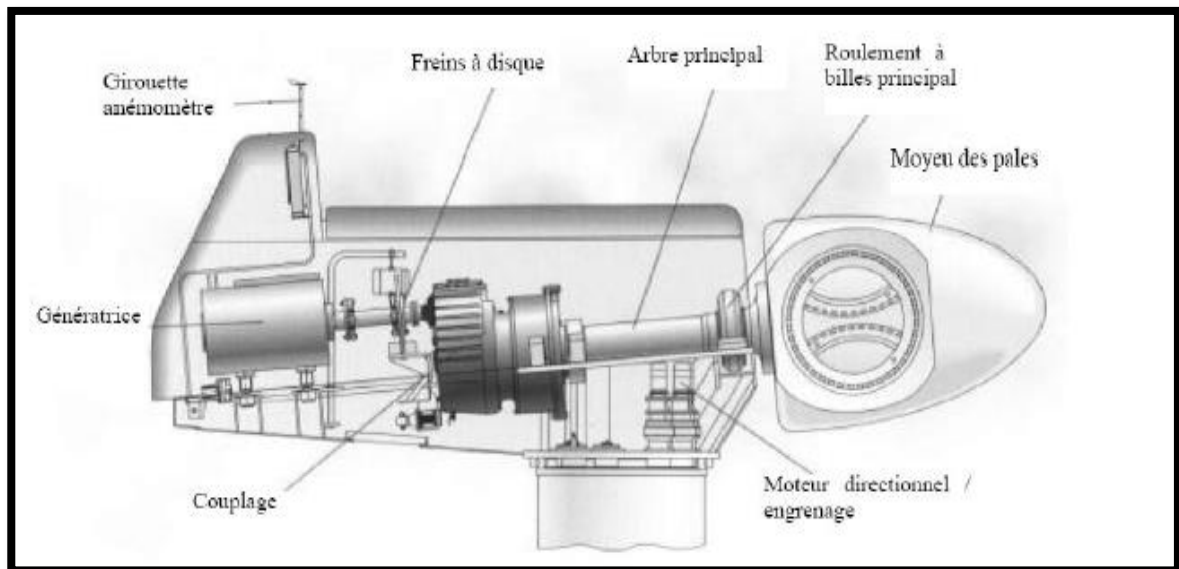


Figure I 7 Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine éolienne

- Les pales : Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor .Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.
- Le moyeu : C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent.

I.4 Structures des systèmes éoliens

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration

I.4.1Eolienne à vitesse fixe

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement couplée sur le réseau électrique Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control).[10]

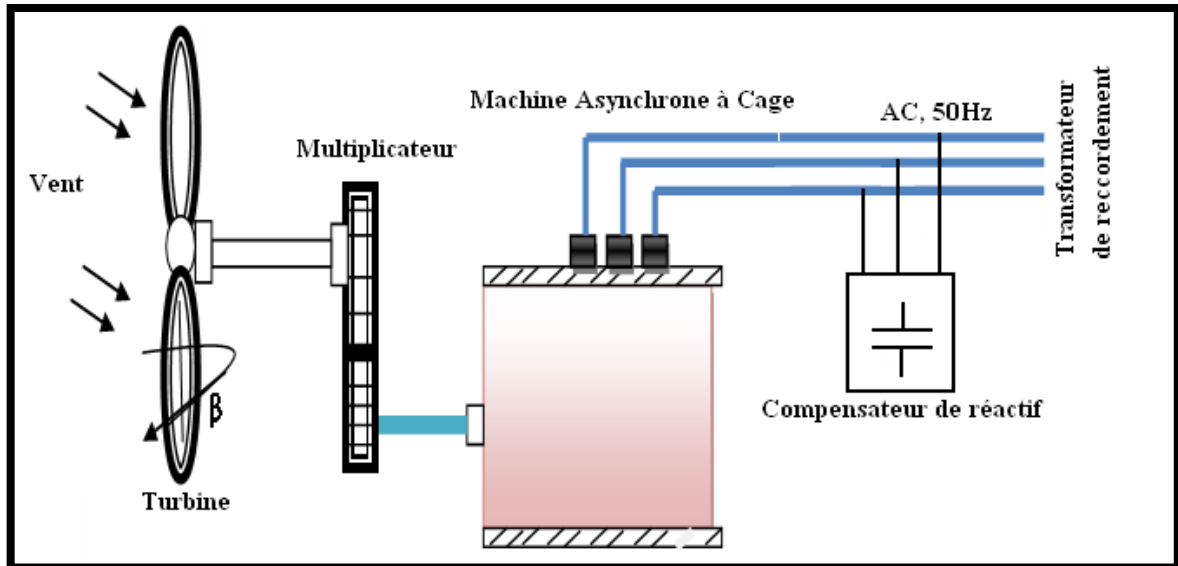


Figure I 8 Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage

Dans cette technologie

- La génératrice asynchrone est directement couplée au réseau.
La vitesse est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice.
- Le couple mécanique entraînant tend à accélérer la vitesse de la génératrice.
- Le système fonctionne alors en hyper synchrone.
- La nécessité d'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne pour avoir une vitesse de rotation supérieure à la vitesse du synchronisme
- Elles possèdent un système électrique plus simple
- Elles ont une très grande fiabilité
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne
On d'autre face
- La puissance extraite n'est pas optimisée.
- La maintenance de la boîte à vitesse.
- L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur.
- La magnétisation de la machine non gérée.

I.4.2 Eolienne à vitesse variable

L'éolienne à vitesse variable connectée au réseau est composée d'une turbine un multiplicateur, un générateur, un convertisseur de puissance,[11]

Les deux structures existantes des éoliennes à vitesse variable

- La configuration basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator.
- La configuration basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné.

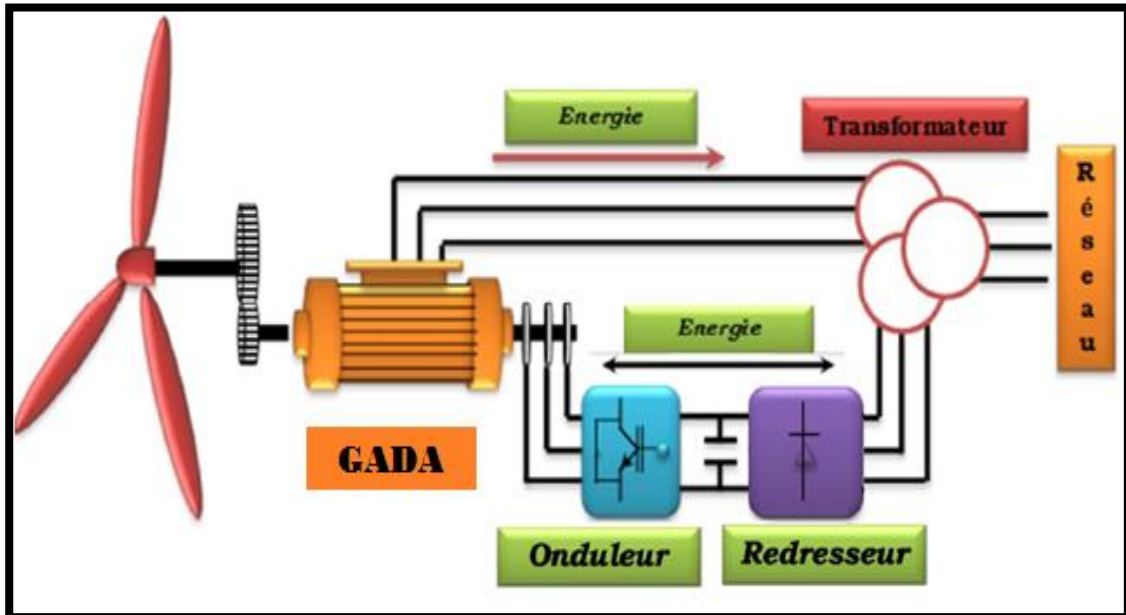


Figure I 9 Génératrice Asynchrone à Double Alimentation GADA à vitesse variable

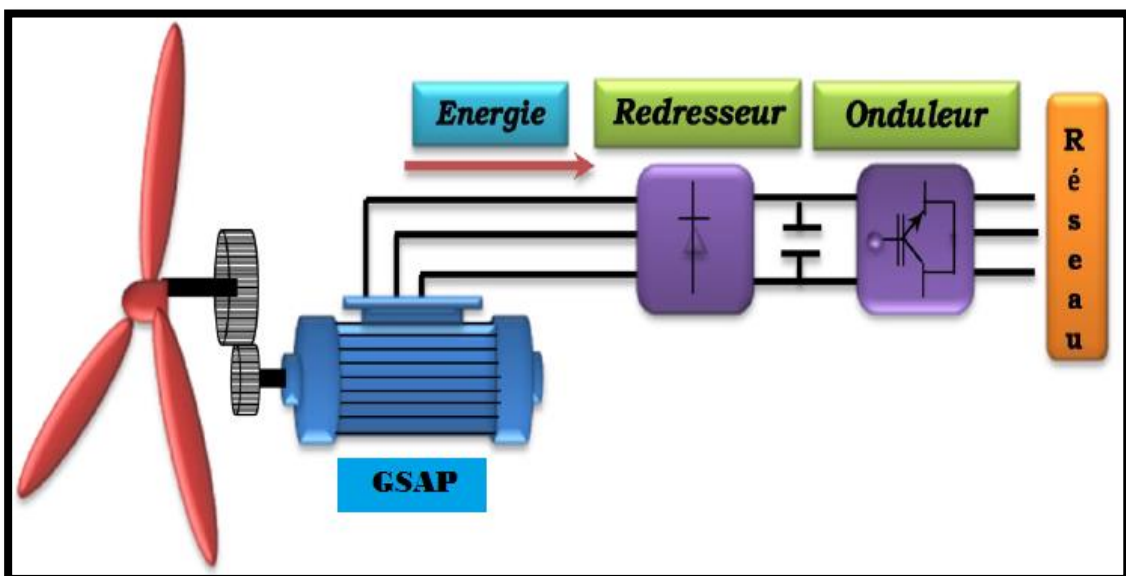


Figure I 10 Génératrice Synchrone GS à attaque directe à excitation bobinée

I.4.2.a Intérêt de la vitesse variable

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse, est donnée par la figure(I.11)

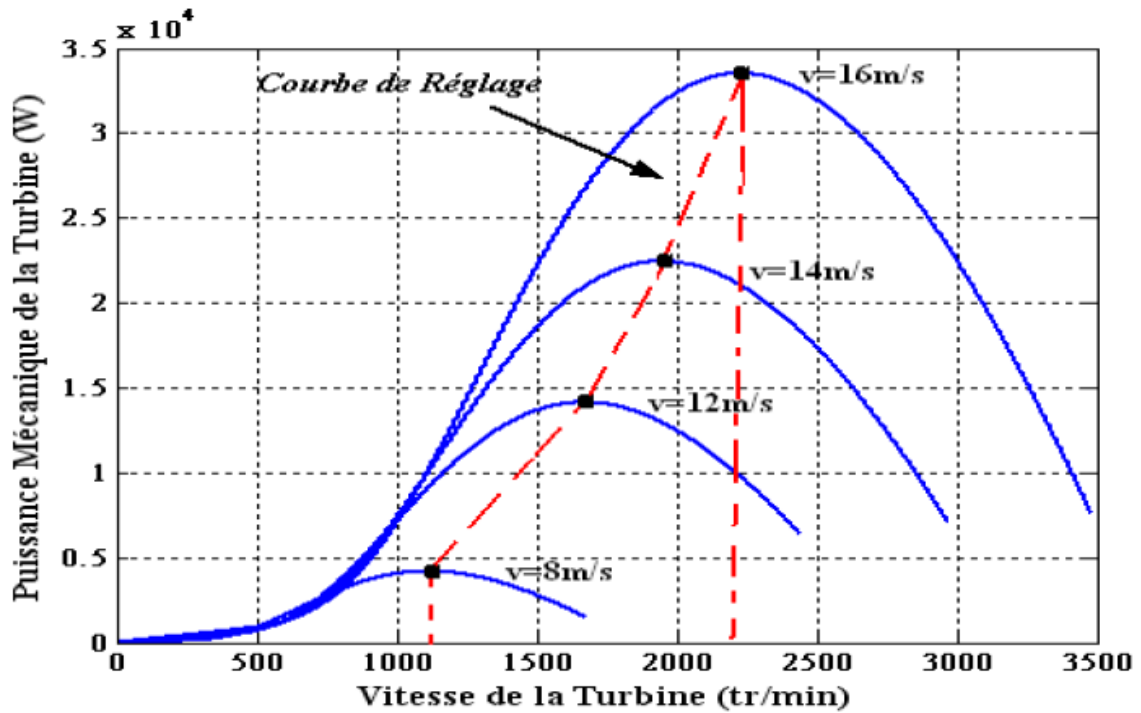


Figure I 11 Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.

Pour une vitesse de vent v_1 et une vitesse mécanique de la génératrice (ω_1), on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (point B).

La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse Supérieure (ω_2). Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

Elles augmentent la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent ou le maximum de puissance est converti. Indirectement la disponibilité et la puissance générée du système sont augmentées.

- Elles nécessitent un système d'orientation des pales simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse du générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesse de vent élevées. En conséquence, pour de faible vitesse de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe.

- Elles réduisent les efforts mécaniques de part le fait que lors de variations du vent, la vitesse de vent sur la puissance générée pour ce domaine de fonctionnement.
 - Elles réduisent le bruit lors des fonctionnements à faible puissance car la vitesse est alors lente.
 - Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique.
- Il existe deux catégories d'éoliennes telles que les éoliennes isolées (autonome) et les éoliennes connectées au réseau

I.4.2.b Eolienne isolée (autonome)

Les éoliennes autonomes sont utilisées dans les gammes de puissance de quelques dizaines de Watts à quelques dizaines de kW pour d'appareils électriques d'instrumentation ou d'éclairage. Les plus petites éoliennes sont utilisées pour les bateaux, le camping ou les stations météo. Les éoliennes de plus grande puissance sont utilisées pour la production destinée à alimenter en énergie électrique des villages isolés.

Les points communs entre toutes ces éoliennes sont leur faible puissance et leur association à une unité de stockage d'énergie, généralement constituée de batteries d'accumulateur, [7]

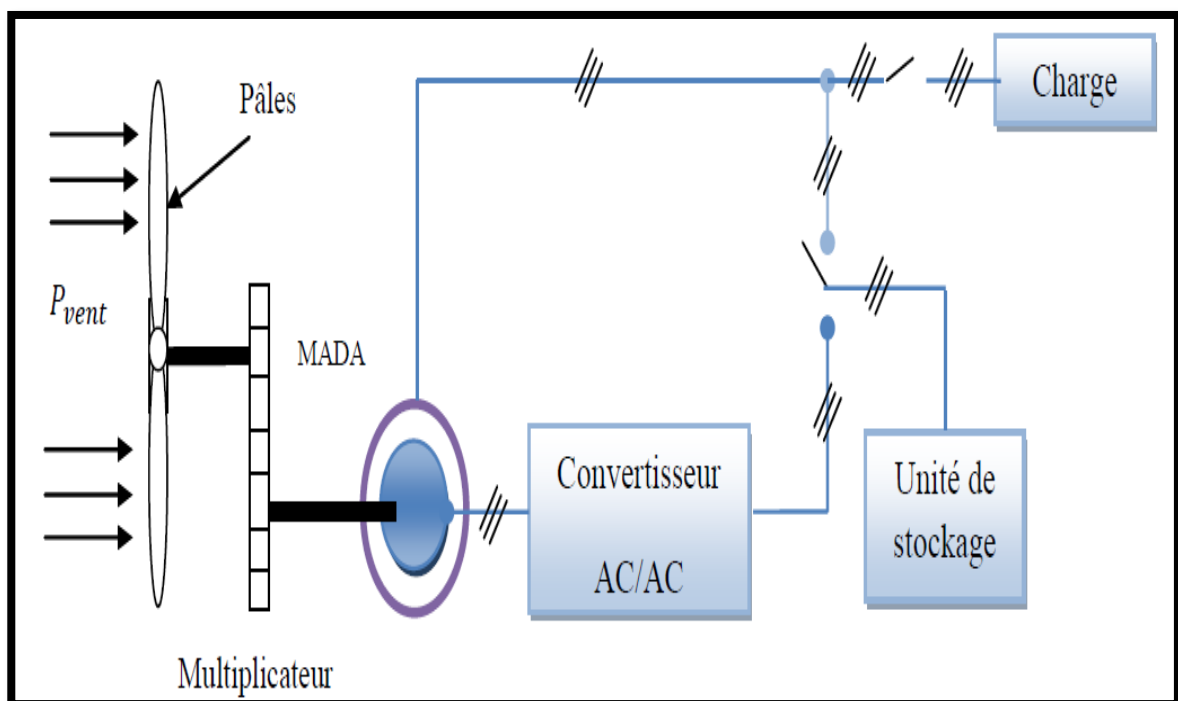


Figure I 12 Eolienne isolée à base de la MADA

I.4.2.c Eolienne connecté au réseau

Les éoliennes connectées au réseau de distribution sont souvent en fonctionnement pour tester le potentiel éolien du site considéré appartenant à des industriels ou des privés qui produisent leur propre électricité et revendent l'excédent au distributeur local. Ce type de production décentralisée est rencontré de plus en plus avec le développement des primes et autres aides à la production d'énergie électrique propre. Les puissances de ces éoliennes peuvent varier, selon qu'il s'agit d'un exploitant privé ou industriel, de 50 kW à 4.5 MW pour les plus récentes éoliennes du marché.

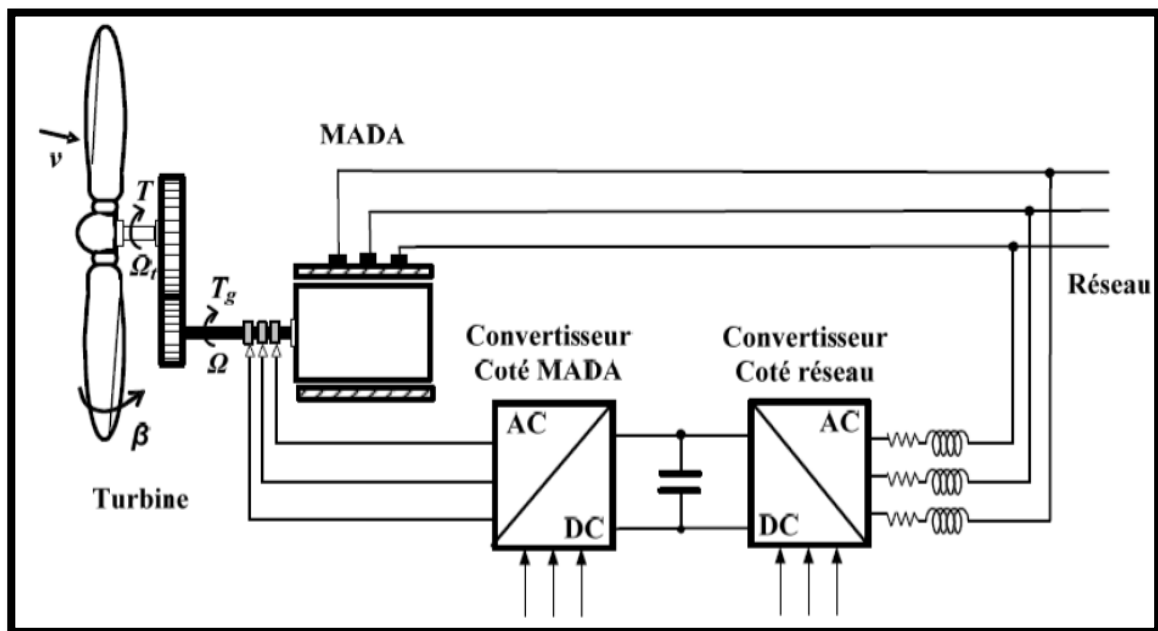


Figure I 13 Eolienne Connectée au réseau à base de la MADA

On estime que cette puissance augmentera à l'avenir, particulièrement dans des applications en mer vu que ce milieu est caractérisé par une vitesse de vent très importante. [11]. Ces éoliennes fonctionnent en permanence et ont, le plus souvent, besoin d'être raccordées à un réseau puissant afin de minimiser l'impact des fluctuations de la puissance générée par ces dernières.

I.4.2.d Avantages

- Meilleur rendement énergétique.
- Meilleure qualité d'énergie électrique.
- Moins d'efforts mécaniques subis par le train de puissance.
- Le maximum théorique est atteint.

I.4.2.E. Inconvénients

- Utilisation de machines spéciales.
- Coûts supplémentaires plus importants (convertisseur, commande,...).

- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.
- La gestion du transfert de puissance entre les convertisseurs, et placement au point de puissance optimum de l'éolienne.

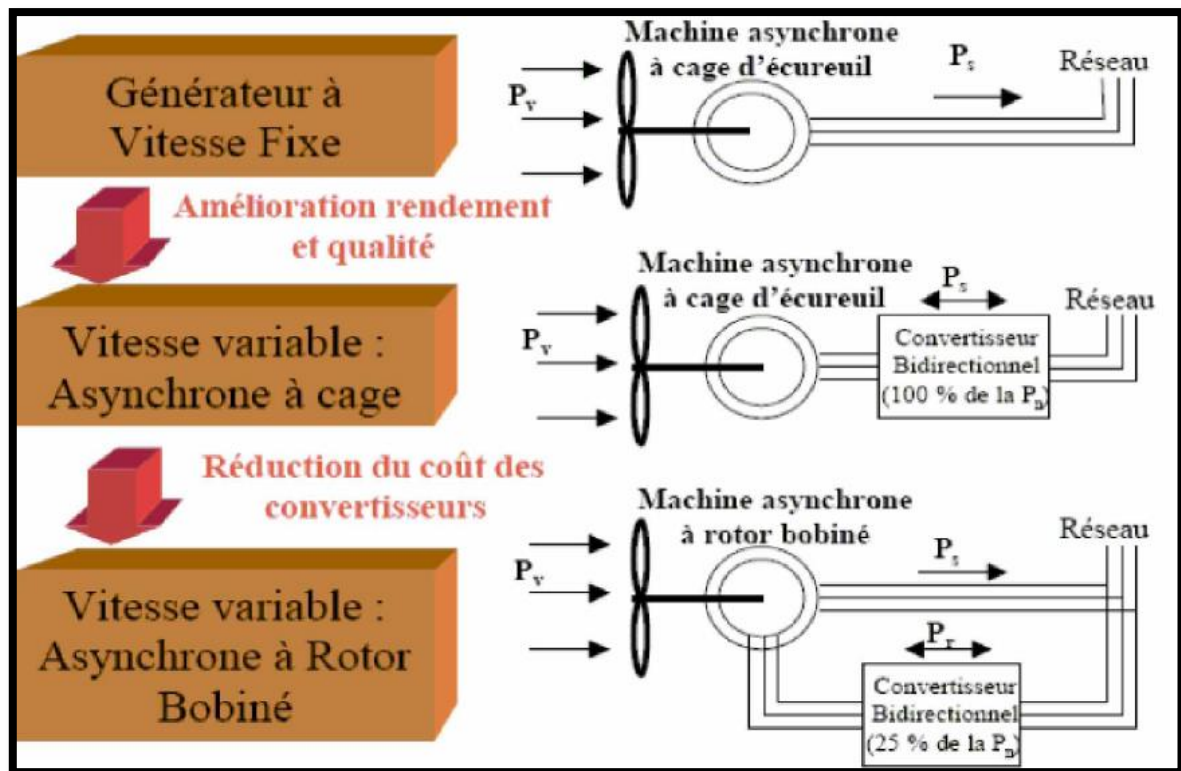


Figure I 14 Evolution de la configuration électrique

I.5 Recherche du rendement maximum MPPT

Les éoliennes utilisées pour la production d'électricité doivent permettre de produire un maximum de puissance en exploitant au mieux l'énergie disponible dans le vent. C'est pour cela les nombreux systèmes de commande de l'éolienne, agissant au niveau de la partie mécanique ou électrique, sont développés pour le maximum de conversion d'énergie. On parle alors de recherche du point de fonctionnement à puissance maximum (MPPT)[12]

Ces systèmes utilisent différents moyens afin d'obtenir ce point de puissance maximum. Il est possible de modifier l'angle de calage des pales, ou la vitesse de rotation de l'hélice ou bien encore jouer sur la commande de la génératrice. [13]

La recherche du maximum se fait en permanence et l'éolienne s'adapte donc à chaque variation du vent pour être dans une configuration d'extraction maximum de puissance.

De tels systèmes incorporent aussi des sécurités qui permettent par exemple de limiter la puissance produite lorsque le vent devient trop importants et risque d'endommager l'éolienne[14]

I.6 Avantages et désavantages de l'énergie éolienne

I.6.1 Avantages

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement.
- L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie notamment, contribuent à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. La concentration de CO₂ a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et elle doublera pour 2050. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6° depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5° C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand.
- Les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais on peut par exemple avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100[15]
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles.
- Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO₂, 21 mille tonnes de SO₂ et 17,5 mille tonnes de NO₂. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides. [15]
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie à ces pays pour se développer.
- L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.

- Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.
- Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

I.6.2 Désavantages

- L'impact visuel. Ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit, il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur.
- L'impact sur les oiseaux, certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs
- la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est pas toujours très bonne.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques

I.7 conclusion

Dans ce chapitre, premièrement nous avons décrit les généralités sur l'énergie éolienne. Puis, un bref la présentation la définition du les énergies éoliennes et son rôle ainsi que les types des aérogénérateurs et différents constituants d'un aérogénérateur Ensuite, nous avons présenté les deux technologies des éoliennes à savoir les éoliennes à vitesse fixe et celles à vitesse variable et

Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde et dans l'Algérie Cette étude nous a permet de comprendre le principe de fonctionnement d'une éolienne d'une manière générale

A la fin de ce chapitre présente les avantages et des avantages des énergies éoliennes

D'après cette étude, nous avons choisi d'étudier la chaine éolienne par machine asynchrone double alimentation pour la commande de turbine Elle a l'avantage d'être flexible d'où le nom de machine généralisée. Le fonctionnement sur les quatre cadrans dans une large gamme de vitesse est l'argument majeur de sa supériorité. Grâce à une commande spécifique cette machine peut être dédiée à l'optimisation des échanges d'énergie d'où son application dans la génération d'énergie éolienne cette commande caractérise un couple et grande puissance mécanique grâce à la vitesse de vent .nous avons présenté ça à la chapitre suivante.